

## 論文の内容の要旨

論文題目	リハビリテーションへの応用を見据えた脳・身体モデルの歩行シミュレーション研究
学 位 申 請 者	市村 大輔

超高齢社会において、リハビリテーション（以下リハビリ）は運動機能の回復のみでなく、精神面、認知機能の改善にも効果が期待されている。また、健康的に生活できる期間である健康寿命への関心の高まりから、予防的な面でもリハビリが重要視されている。このようにリハビリは今後もさらに社会的な要求が増加していくことが予想される。

リハビリを必要とする患者は加齢による変化、再発、合併症など複合的な症状を有し、個人差が大きい。そのため、特定の症状に対する医療効果を検証しようとする臨床研究のみでは、被験者の確保や治療効果の見極めが難しい。科学的根拠の積み重ねが乏しいため、リハビリは具体的な方法論が確立されていない。よって、実際の臨床現場ではセラピスト個人の知識や経験によってリハビリを提供してしまう。特に難渋する症例では効果的なリハビリ法をみつけるまで様々な方法を試みる。この試行錯誤は時に長い時間がかかり、また患者に対し苦痛を強いることがある。

この問題を解決するために、患者の特徴や病態を再現するモデルを構築し、リハビリの試行錯誤過程を数値シミュレーションで行うことが考えられる。そして、実際の患者にリハビリを提供する前に、どのようなリハビリ法が有効なのかを予測する。そうすることで、医療現場は効率化され、患者への身体的、精神的、金銭的負担も大幅に改善すると考えられる。

本研究では、まず特徴や病態を再現できるモデルを構築することを目的とした。特に日常生活で重要な基礎的動作である歩行に着目した。(a) 特徴的な症状である小脳損傷歩行と(b) 罹患率が高い脳卒中片麻痺歩行を再現した。

(a) 小脳歩行モデルは、小脳の数理モデルと下肢筋骨格系動力学モデルを接続した脳・身体モデルを構築した。特に、小脳による足底接地のタイミング予測が2足歩行にどのような影響を与えうるのかを、数値シミュレーションによって検討した。健常歩行獲得後、両側の小脳を停止すると転倒してしまうこと、片側の小脳を停止すると転倒はしないものの停止側の脚がより高く挙上することを確認した。

後者は既に報告されている小脳損傷時に見られる歩行動作に対応する。さらに、この状態では転倒しやすく、特に体幹に近い股関節トルクの大きさに強く依存した。この結果は、小脳患者に対して体幹を鍛えるという伝統的なリハビリの知見と一致する。これらのことより、脳損傷と運動障害の因果関係を解明するツールとして、このような数値シミュレーションの有効性を示唆するものである。

(b) 脳卒中片麻痺歩行モデルでは、神経系システムとして歩行のリズムを生み出す階層性神経制御モデルと18筋を有する下肢筋骨格系動力学モデルを接続し、健常歩行モデルを構築後、片足の神経入力を弱める病的な状態を設定した。病的歩行シミュレーションより、病的状態が神経系システムに与える影響と報告されている脳卒中片麻痺患者の特徴の類似性を検証した。まず、健常歩行獲得後、脳卒中片麻痺状態を再現するために片脚への神経系入力を弱めると、即座にこのモデルは転倒した。その後、安定した歩行を再獲得するためにフィードバックパラメータを調整した。安定した歩行は再獲得できたが、歩行制御器へのフィードバックパラメータに依存して、神経系システムの特徴的な変化が確認できた。これは報告されている慢性期脳卒中患者のデータと類似しており、フィードバックパラメータの変化が病的歩行に関与することが示唆された。

これらの結果は、時事刻々とダイナミクスが変化する複雑な2足歩行を数値シミュレーションである程度模擬できることを示す。神経損傷患者は、その機能欠損だけではなく環境に適応しようとする代償動作も相まって、歩行の複雑さが増す。そのため、計測などで歩行パターンを分類できたとしても、因果関係を明らかにすることは困難である。しかし、本研究で再現した小脳損傷患者と脳梗塞患者の歩行は過去に報告されている生理学的知見と類似する。そして、それは神経モデルからの信号の有無や、フィードバックパラメータの変化に起因することが示された。本研究では、2次元の簡略化した身体モデルを使用した十分に神経損傷と歩行障害の因果関係を議論できる要素は含まれていると言える。

本研究を発展させることにより、患者の個人差を包括したモデルを構築し、リハビリの試行錯誤を計算機上で再現可能になりうる。リハビリシミュレーションを用い、身体的・精神的・金銭的な苦痛を与えうるリハビリの試行錯誤から脱却し、より再現性、妥当性に富んだものへと発展させることで、より有効で効率的なリハビリを患者に提供し、患者の社会復帰や生活の質向上に貢献できると考えられる。このようにリハビリシミュレーションの構築は社会的意義は非常に大きく、本研究はそれに先鞭をつけるものである。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 市村 大輔

審査委員主査 山崎 匡

委員 山本 野人

委員 龍野 智哉

委員 阪口 豊

委員 長谷 和徳

超高齢社会を迎え、リハビリテーション（以下リハビリ）のニーズは高まってきた。しかしながら、リハビリは患者の個別因子が強くかつ基本的にセラピストの知識や経験に基づく試行錯誤の連続であるため、具体的な方法論が確立されているとは言えず、その解決は急務である。この問題に対して、本論文ではリハビリの数理モデルによる理論的なアプローチを提案している。脳-身体モデルを構築し、小脳損傷患者の特異的な歩行と、脳梗塞患者の代償歩行をそれぞれ再現し、内部パラメータの違いなどで歩容の違いを検討している。

本論文は次の5章から構成されており、第3,4章が申請者の行った研究である。

第1章では、リハビリの社会的必要性と現状、試行錯誤的になっているリハビリ介入などの問題点を挙げている。その上で、本論文が提案する数理モデルによるリハビリシミュレーションの有用性について、議論を展開している。日常生活で重要な基礎動作である歩行に着目し、まずは特徴や病態を再現できる脳-身体モデルの構築、そしてリハビリ応用を見据えた病的2足歩行シミュレーションの実装が目的であると述べられている。

第2章では、歩行に関わる生理学的な知識とモデリング・シミュレーション手法を説明している。歩行の基礎的分類、歩行に関わる神経系、神経損傷患者の特徴的な歩行、また各モデル、遺伝的アルゴリズム、並列計算手法などについて述べられている。

第3章では、小脳の数理モデルと下肢筋骨格系動力学モデルを接続した脳-身体モデルの数値シミュレーションについて説明している。シミュレーション結果より両側の小脳モデルを停止すると転倒してしまうこと、片側の小脳モデルを停止すると転倒はしないものの停止側の脚がより高く挙上することが示されており、後者は過去の症例報告や動物実験の結果と類似していることが述べられている。さらに、片側の小脳モデルを停止した状態では転倒しやすく、特に体幹に近い股関節トルクの大きさに強く依存し、この結果は、小脳患者に対して体幹を鍛えるとい

う伝統的なリハビリの知見と一致すると述べている。これらから、脳損傷と運動障害の因果関係を解明するツールとして、このような数値シミュレーションの有効性を示している。

第4章では、神経系システムとして歩行のリズムを生み出す階層性神経制御モデルと18筋を有する下肢筋骨格系動力学モデルを接続し、健常と病的の両状態で2足歩行数値シミュレーションについて説明している。健常歩行獲得後、片脚への神経系入力を弱めると、即座にこのモデルは転倒し、その後、安定した歩行を再獲得するためにフィードバックパラメータの調整が行われている。安定した歩行は再獲得できたが、歩行制御器へのフィードバックパラメータに依存して、神経系システムの特徴的な変化が示されている。これは報告されている慢性期脳卒中患者のデータと類似しており、フィードバックパラメータの変化が病的歩行に関与する可能性があるかと述べられている。

第5章では本論文の成果をまとめ、今後の課題を述べている。また本研究分野の将来性や展望について述べ、本論文の立ち位置を記している。

本論文について、令和2年1月20日に公聴会および最終審査会を開催して、学位授与の審査を行った。審査の結果、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。